Arch. Met. Geoph. Biokl., Ser. B, 21, 99—109 (1973)
© by Springer-Verlag 1973

551.586

Physiologische Wirkung elektromagnetischer Wellen bei tiefen Frequenzen

I. Historischer Überblick und gegenwärtiger Stand der Forschung[1]

W. Ludwig, M. A. Persinger und K.-P. Ossenkopp

Mit 3 Abbildungen

Eingegangen am 28. August 1972

Zusammenfassung

Nach einem Rückblick auf die Entwicklung der ELF- und VLF-Forschung werden praktische und theoretische Ergebnisse der letzten Jahre bezüglich der Einwirkung dieser tiefstfrequenten elektromagnetischen Wellen auf Organismen angeführt.

Einige bisher nur im Ergebnis veröffentlichten Berechnungen, z. B. über Energieverhältnisse, werden im Detail gebracht, und es wird näher auf die kristallinflüssigen Phasen in organischem Gewebe eingegangen.

Es zeigt sich, daß der beobachtete Einfluß von ELF- und VLF-Wellen auf organisches Gewebe sowohl einen dämpfenden als auch einen gewebedifferenziert stimulierenden Effekt haben kann.

Summary

Physiological Effects of Electromagnetic Fields in the ELF Region. A Review. Part I[1]

A review with regard to the development in biological ELF- and VLF-research of the past years and the experimental and theoretical results are stated.
Some calculations about energy relations a. s. o. published only in their results are given here in detail in cennection with the liquid crystal structure of organic tissue.

The result is that the observable influences of ELF- and VLF-fields on organic tissue may have a damping as well as a stimulating effect on special organic tissues.

[1] Von W. Ludwig.

Im Zusammenhang mit der Eroberung des Weltraumes rückt heute ein Grenzgebiet zwischen Medizin und Physik in den Vordergrund, das sich mit den physikalischen Umwelteinflüssen auf Organismen, insbesondere den Menschen, befaßt. Von besonderem Interesse sind dabei elektromagnetische Wellen, die im System Erdoberfläche — Ionosphärenunterseite einerseits und in biologischem Gewebe andererseits Eigenwerte, also Resonanzeigenschaften, vorfinden.

Schon lange vor dem Beginn der Weltraumfahrt haben sich Physiker, Astronomen, Elektroniker und Ärzte sowie Meteorologen mit diesem Gebiet befaßt. M. Curry schrieb 1946 ein zweibändiges Werk über Bioklimatik [6], das Aufsehen erregte, aber auch Kritik einbrachte. R. Tomaschek veröffentlichte mehrere Arbeiten über kosmische Kraftfelder, und über experimentelle Ergebnisse berichtete G. Piccardi [29]. Bekannt sind auch die Arbeiten von M. Takata über Umwelteinflüsse auf die Blutgerinnung [34]. J. H. Nelson fand eine signifikante Korrelation zwischen Planetenbewegung und dem Mögel-Dellinger-Effekt, der Funkstille im Kurzwellenverkehr [22].

Eine der ersten theoretischen Arbeiten auf diesem Gebiet stammt von W. O. Schumann, der die Eigenfrequenzen des Systems Erdoberfläche — Lufthülle — Ionosphäre mit Hilfe der Maxwellschen Theorie berechnete [33]. H. König konnte diese Kugelschalen-Hohlraumresonanzen im ELF-Gebiet experimentell feststellen (ELF-extremely low frequencies unter 3 kHz) und ihre Abhängigkeit vom Wetter messen [10]. Ähnliche Untersuchungen in den USA bestätigten dies [2].

Sehr umfangreiche Beobachtungen im VLF-Gebiet (very low frequencies 3 bis 30 kHz) und im LF-Bereich (low frequencies 30 bis 300 kHz) hat R. Reiter durchgeführt und in einem Buch zusammengefaßt [31]. In den USA hat insbesondere B. A. Brown jr. die biologische Wirkung solcher Wellen untersucht [4].
Die Messung und Berechnung der Ausbreitungsbedingungen der Wellen im kHz-Bereich liegen im Interessebereich der Rundfunktechnik, weshalb es hierüber sehr zahlreiche Arbeiten gibt, die auf der Hertzschen Theorie der Dipolstrahlung [9] aufbauen [7, 23, 35, 37, 38, 5].

An einem Mikrowellenmodell konnten die Ausbreitungsverhältnisse der VLF-Wellen in Abhängigkeit von der elektrischen Bodenleitfähigkeit untersucht werden [15]. Kurz zusammengefaßt ergibt sich:

Das System Erdoberfläche — Ionosphärenunterseite hat Eigenwerte im ELF-Bereich und Wellenleiter-Modes im VLF-Bereich. Angestoßen wird dieses Resonanzsystem durch Rekombinationen elektrisch geladener Teilchen in der Atmosphäre, besonders kräftig durch Gewitter. Durch verschiedene Einflüsse wird diese atmosphärische Impulsstrahlung („Atmospherics" oder „Sferics") modifiziert, und zwar zeitlich in Amplitude und Frequenz durch tägliche und jährliche Veränderungen in der Ionosphäre und durch Wettervorgänge (Turbulenzen in der Atmosphäre, die zu Ladungstrennungen führen) und örtlich durch die Wellenleiter-Modes des Systems Erde — Ionosphäre, besonders durch Filterwirkung von Uneben-

heiten auf der Erdoberfläche und durch Entstehung von Sekundärwellen an Sprungstellen der elektrischen Bodenleitfähigkeit. Der Abstand von Erregungszentrum und Beobachter spielt dabei eine entscheidende Rolle [15].

Vor allem bei Annäherung eines Gewitterherdes oder auch nur eines turbulenten Tiefs ändern sich am Beobachtungsort folgende Parameter: a) die Amplitude, d. h. die Feldstärke der Wellen im ELF- und VLF-Bereich; b) die Folgefrequenzen oberhalb einer gegebenen Amplitudenschranke; c) die Statistik der ELF-Folgefrequenz zugunsten häufigerer Impulskaskaden und statistischer Schwankungen im Gegensatz zu einer nahezu konstanten Folgefrequenz bei großer Entfernung von der Sendequelle (dann kommen nämlich die ELF-Resonanzen stärker zur Geltung).

Bezüglich der biologischen Wirkung muß außerdem betrachtet werden, welche Intensitätsabschwächung die betrachteten Wellen durch Medien, vor allem Gebäude, erfahren. Es ergibt sich theoretisch und praktisch, daß die magnetische Komponente der ELF-Wellen nahezu ungehindert in alle Räume und Organismen eindringen kann, während bei höheren Frequenzen (VLF) schon merkliche Abschirmungsfaktoren durch Stahlwände möglich sind [19]. Die elektrische Feldstärke läßt sich hingegen relativ leicht bei tiefen Frequenzen (ELF und VLF) abschirmen. Für einzelne Personen genügen dazu Decken mit einer elektrisch leitenden Einlage [20].

Die biologische Wirkung der ELF- und VLF-Wellen wurde wiederholt festgestellt [1, 10, 14, 16, 24, 25, 26, 27, 28, 32]. Als Grundlage für einen Wirkungsmechanismus wurde unter anderem eine Beobachtung von Kuhnke und Zink angesehen [11], die zeigte, daß bei Körperwechselströmen, die mittels auf die Haut aufgelegter Elektroden hervorgerufen werden, Frequenzänderungen vorzugsweise vagotone Effekte erzielen, während Amplitudenerhöhung sympathikusstimulierend wirkt. Dabei wurden kontinuierliche ELF-Wechselströme verwendet. Bei steigender Amplitude treten hierbei repetetive Aktivitäten auf [3].

Die Übertragung dieser Ergebnisse auf drahtlose impulsförmig modulierte VLF-Wellen ist jedoch nicht ohne weiteres möglich, und eine solche Hypothese [30] ließ sich experimentell bisher nicht bestätigen. Dabei wurden nämlich nur die oben unter a) und b) genannten Parameter beachtet, nicht aber der offenbar sehr wirksame Effekt c) [16].

Tatsächlich ändern sich nicht bei jeder Annäherung eines Tiefdruckgebietes sämtliche oben genannten Parameter a) bis c) in gleicher Stärke. Es ist nämlich möglich, daß eine elektrische Entladung in

einer Wolke je nach ihrer Stärke entweder alle Ladungstrennungen in ihrer Umgebung auslöscht oder aber weitere Rekombinationen von Ladungstrennungen triggert. Im ersten Fall entsteht nur ein großer Impuls, im zweiten eine ganze Impulskaskade [20]. Im ersten Fall bleibt eine merkliche Änderung der Impulsstatistik aus, und in solchen Fällen sind kaum biologische Effekte durch VLF-Wellen festzustellen [20]. Leider wurden aber von einem in der Bundesrepublik Deutschland vor etwa 15 Jahren ins Leben gerufenen medizin-meteorologischen Beratungsdienst nur die Halbstunden-Impulssummen oberhalb von zwei oder drei Amplitudenschranken registriert.

Bei einer Summenbildung geht jedoch die interessierende Statistik der Folgefrequenz völlig verloren. Eine großangelegte Untersuchung des Institutes für Meteorologie und Geophysik der Freien Universität Berlin-West in Zusammenarbeit mit mehreren Berliner Kliniken brachte daher bis jetzt auch keine signifikante Korrelation zwischen diesen Impulssummen und Krankengeschichten [39]. Glücklicherweise waren aber während der Registrierzeit außer den Zählgeräten auch Schreiber angeschlossen, deren Analogwerte sich — wenn auch sehr mühsam — noch auswerten lassen. In Zukunft sollten an die Ausgänge der Empfänger unmittelbar Computer angeschlossen werden, um die Auswertezeit abzukürzen.

Die zahlreichen bisher festgestellten Korrelationen zwischen ELF- und VLF-Wellen mit physiologischen Meßwerten legten theoretische Betrachtungen über mögliche Wirkungsmechanismen nahe [17, 18]. Zunächst läßt sich aus dem Pointingschen Vektor S der VLF-Welle berechnen, daß der Energieinhalt e eines Atmospherics-Impulses (Dauer T), bezogen auf die Fläche F einer Zellmembran, in die Größenordnung der Energie eines Knospenpotentials (miniatur excititory postsynaptic potential [8]) an einer Synapse kommt:

$$e = F \int_T |\bar{S}|\, dt = \frac{F}{120\pi} \int_T |\bar{E}|^2 \cdot dt\,(Ws) \approx \frac{1}{2} \cdot \frac{10^7 \cdot F}{120\pi} E^2 \cdot T\,(\text{erg})$$

mit $\bar{E}$ = Vektor der elektrischen Feldstärke. Mit den Meßdaten $F = 3 \cdot 10^{-8}\,\text{cm}^2$, $E = 2 \cdot 10^{-4}\,\text{Vcm}^{-1}$ und $T = 10^{-3}\,\text{s}$ erhält man $e = 1{,}5 \cdot 10^{-14}$ erg. Demgegenüber beträgt die Änderung der potentiellen Energie Δe an einer Synapse mit der Spaltweite d bei der Potentialänderung ΔU (relative Dielektrizitätskonstante ε):

$$\Delta e = \frac{1}{2} \varepsilon_0 \varepsilon (\Delta u)^2 \cdot \frac{F}{d} \cdot 10^{-7}\,(\text{erg}) \text{ mit } \varepsilon_0 = \frac{1}{4\pi 9 \cdot 10^{-11}}\,(As\ \text{V}^{-1}\,\text{cm}^{-1}).$$

Mit den Meßdaten $d = 2 \cdot 10^{-6}\,\text{cm}$, $\varepsilon \leqq 80$ und $\Delta U = 10^{-4}\,\text{V}$ wird $\Delta e \leqq 0{,}5 \cdot 10^{-14}\,\text{erg} < \text{e}$.

Es lassen sich noch weitreichendere Kalkulationen anstellen. Da in organischem Gewebe an vielen Stellen längere Fasern (Kollagenfasern, Nervenfasern) durch Doppelmembranen (Zellwände, Synapsen) unterbrochen werden, läßt sich berechnen, daß in diesen Membranen durch Atmospherics peripher höhere Feldstärken entstehen als im freien Raum. Der oft vorgebrachte Einwand, die Feldstärke der Atmospherics sei im Vergleich zu den Membranpotentialen viel zu klein, um eine Wirkung zu entfalten, läßt sich damit widerlegen. Dazu ist auch folgendes interessant: Der im trüben Nilwasser lebende Nilhecht *Gymnarchus niloticus* orientiert sich mittels elektromagnetischer Impulse und spricht noch auf elektrische Feldstärken von wenigen μV/m an [12, 13].

Die betrachteten Fasern wirken — besonders wenn sie mit Myelin gegen die Umgebung isoliert sind — als Antennen, in denen die Atmospherics elektrische Wechselspannungen induzieren. (Beispielsweise funktioniert der U-Boot-Funk auch im VLF-Bereich über Antennen im Salzwasser.) Ähnlich wie an der Emitter-Basis-Schicht eines Eingangstransistors beim Rundfunk entsteht an der betrachteten Membran, welche an die „Antenne" angeschlossen ist, eine um mehrere Größenordnungen höhere elektrische Feldstärke als im Freien.

Für peripheres Nervengewebe ergibt sich ein Vergrößerungsfaktor von 10 Millionen [17]. Damit wird verständlich, daß ein einziger Atmospherics-Impuls in der Lage ist, Aktionspotentiale an allen beteiligten Synapsen auszulösen. Dies erklärt sich aus der kristallinflüssigen Struktur der Zellmembran.

A. Saupe hat die Debye-Theorie der dielektrischen Relaxation für normale Flüssigkeiten erweitert auf kristalline Flüssigkeiten [21].

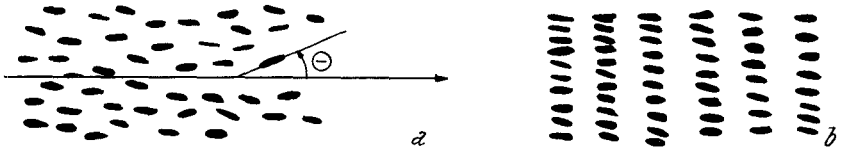

Abb. 1. Orientierung langgestreckter Moleküle bei kristallinen Flüssigkeiten
a) mit nematischer Phase, Θ = Orientierungswinkel eines Moleküls zur Hauptrichtung (Pfeil); b) mit smektischer Phase (bekanntes Beispiel: Seifenblase)

Von den drei möglichen Arten flüssiger Kristalle (nematische, smektische und cholesterinische Phase) liegen bei organischem Gewebe die nematische und bei Zellmembranen die smektische Phase vor. Bei der nematischen Phase sind langgestreckte Moleküle (im Fall

organischen Gewebes Peptidketten) vorzugsweise achsenparallel orientiert (Abb. 1 a), bei der smektischen Phase außerdem noch senkrecht zur Molekülachse so geordnet, daß die Molekülendpunkte in jeweils einer Ebene liegen (Fig. 1 b).

Bei diesen beiden Phasen treten im Gegensatz zu normalen Flüssigkeiten (ohne Ordnung, Abb. 2) *zwei* Dielektrizitätskonstanten auf, je nach der Orientierung des von außen angelegten Feldes zur Richtung der Molekülachsen, ob parallel oder senkrecht dazu.

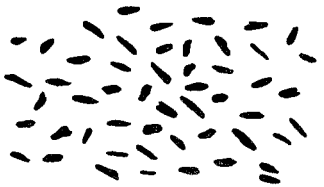

Abb. 2. Orienteirung langgestreckter Moleküle bei normalen Flüssigkeiten

Senkrecht zu den Molekülachsen zeigt sich vorzugsweise normale Debye-Dispersion im Mikrowellenbereich. Parallel zu den Molekülachsen kommt jedoch wegen der hohen zwischenmolekularen Kräfte von Molekül zu Molekül ein Verzögerungsfaktor (retaring factor) zum Tragen, der die Dispersionsfrequenz in den LF- und VLF-Bereich verschiebt. Dieser Verzögerungsfaktor g ergibt sich aus der erweiterten Debye-Theorie zu

$$g = \frac{\langle |\cos \Theta| \rangle}{f_0\left(\frac{\pi}{2}\right)}$$

mit Θ = Winkel der Molekülachse zur mittleren Orientierungsachse aller Moleküle (Abb. 1), $\langle |\cos \Theta| \rangle$ = Erwartungswert von $\cos \Theta$ und $f_0(\Theta)$ = Verteilungsfunktion der Molekülwinkel Θ. Bei normalen Flüssigkeiten ist $\langle |\cos \Theta| \rangle = 1/2$, ebenso $f_0 = 1/2$ im ungestörten Fall (ohne Feld).

Bei hoher Nahordnung, z. B. der nematischen Phase, wird $\langle |\cos \Theta| \rangle = 0{,}8$ und bei der smektischen Phase nahezu 1. Der Anteil $f_0(\pi/2)$ der um $\Theta = \pi/2 = 90^0$ gegen die Vorzugsrichtung gedrehten Moleküle ist bei kristallinflüssigen Phasen äußerst gering, d. h. $f_0(\pi/2)$ viele Zehnerpotenzen kleiner als $1/2$. Damit wird der Verzögerungsfaktor g außerordentlich groß und die Relaxationsfrequenz sehr tief. Bei dieser Frequenz schwingen die Moleküle mit definierter Phasenverschiebung zum äußeren Wechselfeld (der hier gebrauchte Begriff „Phase" aus der Schwingungstechnik hat nichts mit dem obigen

Begriff „kristallinflüssige Phase" zu tun, die einen Aggregatzustand ausdrückt).

Eine Zellmembrane besteht nun im allgemeinen aus vier Molekülschichten: Im Inneren stehen sich zwei Proteinschichten gegenüber und werden von je einer Lipoidschicht bedeckt, deren aliphatische Ketten nach außen zeigen („Fluid Mosaic Model" von Singer-Nicolson). Von diesen Membranen stehen sich zwei in engem Abstand gegenüber (Doppelmembran; bei Synapsen: prä- und postsynaptische Membran), die durch elektrostatische Kräfte gegeneinander gedrückt werden. Dieser Druck liegt in der Größenordnung von 50 Torr [36], denn der Zellinnenraum ist positiv gegen den Außenraum aufgeladen (K-Ns-Pumpe, Donangleichgewicht).

Durch diese elektrostatisch bedingte elastische Spannung treten bei den oben genannten Molekülbewegungen im Rhythmus eines äußeren Wechselfeldes rücktreibende Kräfte auf, d. h. es kann zu Resonanzabsorptionen kommen, bei der alle Moleküle synchron mit dem

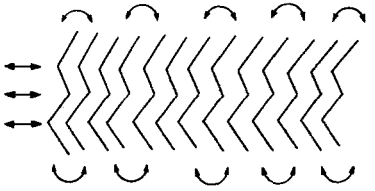

Abb. 3. Molekularer Aufbau einer Zellmenbran. Ober und untere Schicht: Lipoide; mittlere Schichten: Proteine; Pfeile: Bewegungsrichtungen bei inneren elastischen Schwingungen

äußeren Feld schwingen und dem Feld Energie entziehen. Hierbei gerät die Zellmembran in innere elastische Torsionsschwingungen (Abb. 3).

Die Membran hat natürlich außerdem transversale Eigenresonanzen wie ein Trommelfell, die ebenfalls im kHz-Bereich liegen. Bei einer Zugspannung tangential am Membranrand in der gleichen Größenordnung wie der oben angegebene elektrostatische Druck ergibt sich z. B. für eine Kreismembran vom Radius $R = 1\,\mu\text{m}$ mit der Dichte $\varrho = 1\,\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ (P = Zugspannung in $\text{g} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$) eine Grundfrequenz f von

$$f = \frac{1}{\sqrt{2} \cdot R} \cdot \sqrt{\frac{P}{\varrho}} = 50\,\text{kHz}.$$

Wegen der Vielgestaltigkeit der Synapsen in höheren Organismen ist es daher durchaus möglich, daß beide Resonanzfrequenzen, die

molekulare und die elastische, zusammenfallen. Dann ist der im folgenden beschriebene Effekt besonders ausgeprägt [36].

Eine mechanische Schwingungsbewegung der Membran bedeutet auch eine Änderung der Öffnungsweite von in der Membran befindlichen Poren für die K-Na-Pumpe. Bei einer kurzzeitigen Vergrößerung einiger solcher Poren können sich an dieser Stelle die unterschiedlichen Ladungen zu beiden Seiten der Membran ausgleichen. In diesem Augenblick verschwindet dort die elektrostatische Kraft, welche die Doppelmembran zusammenpreßte. Durch den Wegfall dieses Druckes erschlafft die Membranspannung örtlich, und weitere Poren in der Nachbarschaft werden sich erweitern. Dieser Vorgang breitet sich wie eine Kettenreaktion flächenförmig über die gesamte Membran aus. Bei synaptischen Membranen wird dabei ein Aktionpotential ausgelöst. Die depolarisierte Membran hat nunmehr eine wesentlich tiefere elastische Resonanzfrequenz, da die Membranspannung kleiner geworden ist. Das Analoge gilt für vorerregte Membranen.

So ist es verständlich, daß nicht nur eine bestimmte Frequenz im VLF-Bereich in Resonanz mit den Membranen ist, sondern ein breites Frequenzgebiet, bestimmt durch die Skala der Vorerregerzustände der einzelnen Membranen. Denn Vorerregungen laufen im Organismus ja ständig ab.

Offenbar kann sich das Gewebe aber rasch an ein unmoduliertes Dauersignal im kHz-Bereich anpassen (Aufenthalt in der Nähe von Längstwellensendern). Schon ein geringer ständiger Vorerregungszustand aller Zellmembranen erhöht die elektrische Leitfähigkeit der Membran um so viele Zehnerpotenzen, daß der oben angegebene Verstärkungsfaktor für die Feldstärke beträchtlich zurückgeht und die vom äußeren Feld an den Membranen erzielten Feldstärken vernachlässigbar klein werden.

Nur wenn impulsartige Änderungen des äußeren Feldes auftreten, laufen die beschriebenen Prozesse an den Zellmembranen ab. Der Impulsabstand muß dabei im ELF-Gebiet liegen, da zwischen zwei Impulsen, die wirksam werden, die Refraktärzeit ablaufen muß.

In Binde- und Parenchymgewebe haben Lotmar *et al.* eine Dämpfung der Gewebeatmungsgeschwindigkeit mit natürlichen und künstlichen Atmospherics genügender Feldstärke festgestellt [14]. Die Permeabilitätsänderung an Zellmembranen durch ELF-modulierte VLF-Träger entfaltet demnach nicht nur im Nervensystem eine Wirkung. Dies trifft besonders auch für direkte ELF-Einwirkung (ohne VLF-Träger) zu, die vermutlich auf die Ca-Ionendichte in Membrannähe Einfluß nimmt. Eine Berechnung zeigt, daß ELF-Wellen das Ionen-

milieu an Zellmembranen so verschieben können, daß auch dadurch eine Permeabilitätsänderung die Folge ist [18].

Je dichter Zellmembranen gepackt sind, umso stärker ist die Summierung dieses Effekts im Gewebe. (Im Gegensatz dazu ergab sich für VLF-Wellen nur dann rechnerisch ein möglicher Effekt, wenn die Dichte der Membranen pro Quadratzentimeter nicht zu groß ist [17].)

Die neuesten Untersuchungen von M. A. Persinger in den USA und Kanada zeigen, daß ELF-Wellen während der Embryonalentwicklung einen hochsignifikanten Einfluß auf das Wachstum von Drüsengewebe und auf die Bewegungsaktivität von Ratten haben. Ob diese Wirkung über die Hypophyse oder direkt auf Schilddrüse usw. stattfindet, muß noch untersucht werden. Hier eröffnet sich noch ein weites Feld für zukünftige Forschungen.

Bei der von Lotmar *et al.* gefundenen Dämpfung der Gewebeatmung sollte im künstlichen Feld festgestellt werden, ob dieser Effekt abhängig von der Orientierung der Gewebfaserachsen zum elektrischen Feldvektor ist.

Literatur

1. Altmann, G.: Die physiologische Wirkung elektrischer Felder auf Organismen. Arch. Met. Geoph. Biokl., B, *17*, 269—290 (1969).
2. Balser, M., and C. A. Wagner: Nature *188*, 638—640 (1960).
3. Bromm, B.: Über die Entstehung rhythmischer Impulsfolgen in Nerven. Fortschr. Med. *89*, 956—960 (1971).
4. Brown Jr., F. A.: Cold Spring Harbour Symposia on Quantitative Biology *25*, 57—61 (1960).
5. CCIR-Report 322. World Distribution and Characteristics of Atmospheric Radio Noise, Geneve 1964.
6. Curry, M.: Bioklimatik, Bd. 1-2, Riederau, Ammersee 1946.
7. Davies, K.: Ionospheric Radio Propagation. Dover, N. Y., 1966.
8. Eccles, J. C.: The Physiology of Synapses. American Press, 1964.
9. Hertz, H.: Ausbreitung der elektrischen Kraft. Leipzig 1892.
10. König, H. L.: Über den Einfluß besonders niederfrequenter elektrischer Vorgänge in der Atmosphäre auf die Umwelt. Z. angew. Bäder- u. Klimaheilk. *9*, 481—501 (1962).
11. Kuhnke, W., and O. Zink: Schweiz. Med. Wochenschr. *45*, 1168—1173 (1952).
12. Lissman, H. W.: J. experim. Biol. *35*, 156—158 (1958).
13. Lissman, H. W., and K. E. Michin: J. experim. Biol. *35*, 451—454 (1958).
14. Lotmar, R., W. R. Ranscht-Froemsdorff und H. Weise: Dämpfung der Gewebeatmung (QO_2) von Mäuseleber durch künstliche Impulsstrahlung. Int. J. Biometeor. *13*, 231—238 (1969).

15. Ludwig, W., R. Mecke und H. Seelewind: Elektroklimatologie. Arch. Met. Geoph. Biokl., B, *16*, 237—250 (1968).

16. Ludwig, W., und R. Mecke: Wirkung künstlicher Atmospherics auf Säuger. Arch. Met. Geoph. Biokl., B, *16*, 251—261 (1968).

17. Ludwig, H. W.: A Hypothesis Concerning the Absorption Mechanism of Atmospherics in the Nervous System. Int. J. Biometeor. *12*, 93—98 (1968).

18. Ludwig, H. W.: Der Einfluß von elektromagnetischen Tiefstfrequenz-Wechselfeldern auf höhere Organismen. Biomed. Technik *16*, 67—72 (1971).

19. Ludwig, H. W.: Shieldeffect of Materials in the ELF-VLF Region. Int. J. Biometeor. *17* (in press).

20. Ludwig, H. W.: Abschirmung der elektrischen Feldstärke bei Rheumatikern. Arch. Met. Geoph. Biokl., B. (im Druck).

21. Meier, G., and A. Saupe: Dielectric Relaxation in Nematic Liquid Crystals. Molecular Crystals *1*, 515—525 (1966).

22. Nelson, J. H.: RCA Review *12*, 26—34 (1951).

23. Obayashi, T., S. Fujii, and T. Kidokovo: An Experimental Proof of the Mode-Theory of VLF Ionospheric Propagation. J. Geomagnetism and Geoelectricity *10*, 47—55 (1959).

24. Ossenkopp, K. P., W. T. Koltek, and M. A. Persinger: Prenatal Exposure to an Extremely Low Frequency/Low Intensity Rotating Magnetic Field and Increase in Thyroid and Testicle Whight in Rats. Develop. Psychobiol. (in press).

25. Persinger, M. A.: Open-Field Behavior in Rats Exposed Prenatally to a Low Intensity/Low Frequency, Rotating Magnetic Field. Develop. Psychobiol. *2*, 168—171 (1969).

26. Persinger, M. A., and W. S. Foster: ELF-Rotating Magnetic Fields. Arch. Met. Geoph. Biokl., B, *18*, 363—369 (1970).

27. Persinger, M. A.: Prenatal Exposure to an ELF-Rotating Magnetic Field Ambulatory Behavior, and Lunar Distance at Birth: a Correlation. Psychological Reports *28*, 435—438 (1971).

28. Persinger, M. A., and J. J. Pear: Prenatal Exposure to an ELF-Rotating Magnetic Field and Subsequent Increase in Conditioned Suppression. Develop. Psychobiol. (in press).

29. Piccardi, G.: Physikalische, chemische und biologische Effekte als Ausdruck von Weltraumeinflüssen. Wiener Med. Wochenschr. *106*, 975—980 (1956).

30. Ranscht-Froemsdorff, W. R.: Tagungsberichte der Deutschen Ges. f. Biophysik, Wien 1964.

31. Reiter, R.: Meteorologie und Elektrizität der Atmosphäre. Leipzig 1960.

32. Reiter, R.: A Survey of Human Biometeorology. World Meteorological Organisation, Technical Note No. 65, 1964.

33. Schumann, W. O.: Über elektrische Eigenschwingungen des Hohlraumes Erde — Luft — Ionosphäre, erregt durch Blitzentladungen. Z. angew. Phys. *9*, 373—377 (1957).

34. Takata, M., und T. Murasugi: Flockungsstörungen im gesunden Blutserum. Kosmoterrestrischer Sympathismus. Bioklimat. Beiblätter *8*, 17—27 (1941).

35. Taylor, W. L., and A. G. Jean: Very Low Frequency Radiation Spectra of Lightning Discharges. J. Res. NBS, 63 D, 199—204 (1959).

36. Vanselow, K.: Untersuchungen über die elektrostatisch-mechanischen Kräfte an der Nervenmembran bei der Auslösung des Aktionspotentials. Elektromedizin *11*, 1—5 (1966).

37. Volland, H.: Comparison Between Mode Theory and Ray Theory of VLF-Propagation. J. Research NBS, 65 D, 357—361 (1961).

38. Volland, H.: On the Theory of the Sudden Enhancement of Atmospherics (SEA). J. Atmospheric a. Terrestrical Physics *28*, 409—423 (1966).

39. Wedler, E.: Erfahrungen aus einem Medizin-Meteorologischen Testjahr. Schr.-Reihe Ver. Wass.-Boden-Lufthyg., Berlin-Dahlem, H. 30, Stuttgart 1970.

Anschriften der Verfasser: Dr. Wolfgang Ludwig, Elektromedizin, D-2000 Norderstedt 3, Postfach 1349, Bundesrepublik Deutschland; Prof. Dr. Michael A. Persinger, Environmental Psychophysiology Laboratory, Department of Psychology, Laurentian University, Sudbury, Ontario, Canada; Klaus-Peter Ossenkopp, Department of Education, University of Manitoba, Winnipeg, Manitoba, Canada.